بررسی عوامل مؤثر بر ضریب نفوذ رطوبت در خشک‌شدن سرامیک رسی و تبیین مدل‌تحلیلی فرآیند*

محسن باقریان[۱]	خلیل خلیلی[۲]	سید یوسف احمدی بروغنی[۳]

چکیده در این مقاله ضریب نفوذ رطوبت به‌عنوان یک پارامتر مؤثر در توصیف خشک‌شدن سرامیک رسی مورد مطالعه قرار گرفته است. متغیرهای تأثیرگذار بر ضریب نفوذ مؤثر، درجهٔ حرارت (C^{o} ۴۰-۶۰-۸۰)، رطوبت نسبی (٪۳۰-۵۰-۷۰) و سرعت جریان هوا (ms^{-1} ۱-۲-۳) در نظر گرفته شده و اثرات آنها بر رفتار خشک‌شدن سرامیک بررسی گردیده است. در این تحقیق، آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل طراحی شده است و طی هر آزمایش، کاهش جرم و کاهش حجم نمونه به‌ترتیب توسط ترازو و دوربین‌های متصل به کامپیوتر، ثبت می‌شود. ضریب نفوذ مؤثر از مقایسهٔ مقدار تحلیلی معادلهٔ فیک و مقادیر تجربی و استفاده از الگوریتم تازه گسترش‌یافتهٔ کرم شب‌تاب محاسبه شد که در این الگوریتم تابع هدف، کاهش مقدار خطا بین مقادیر تحلیلی و مقادیر تجربی است. بررسی‌های آماری و آنالیز واریانس ضریب نفوذ مؤثر نشان داد که پارامترهای سرعت، دما و رطوبت محیط خشک‌کن به‌صورت مستقل از یکدیگر بر فرآیند خشک‌شدن تأثیر دارند و هم‌چنین بیشترین تأثیر بر روی ضریب نفوذ مؤثر به‌ترتیب مربوط به درجهٔ حرارت، سرعت وزش و رطوبت محیط است. مقایسهٔ نتایج این تحقیق و مطالعات سایر محققان، حاکی از ٪۹۷ تطابق و کاربردی بودن این روش در محاسبهٔ ضریب نفوذ مؤثر در فرآیندهای خشک‌شدن سرامیک است.

واژه‌های کلیدی خشک‌شدن سرامیک، قانون فیک، ضریب نفوذ مؤثر، ترموگرافی سطح، بهینه‌سازی.

Study the Factors affecting the Moisture Diffusion Coefficient in Drying Clay Ceramics and Explanations the Analytical Model Process

M. Bagherian	K. Khalili	S.Y. Ahmadi Brooghani

Abstract *In this study, effective diffusion coefficient of drying clay of ceramics drying clay ceramics have been studied. In this study, the effects of temperature (40-60-80 °C), relative humidity (30-50-70%) and air velocity (1-2-3 ms-1) on the drying behavior of clay ceramics were investigated. A full factorial design of experiments on a cubic sample was performed. In each trial mass and volume reduction using balance and camera was registered and the drying curve was plotted. Effective diffusion coefficient of moisture using drying curves were calculated using the newly developed algorithm of firefly. In this algorithm, the goal is to reduce the error between the analytical values and experimental values. Statistical analysis and analysis of variance showed that in calculation of the effective diffusion coefficient the velocity, temperature and humidity are independent of each other. The greatest impact on the effective diffusion coefficient is respectively related to the temperature, velocity and environment humidity. The comparison between this study and other studies show that 97% similarity and applicability of this method in calculating the effective diffusion coefficient of the ceramic drying processes.*

Key Words Ceramic Drying, Fick's law, the effective diffusion coefficient, surface thermography, optimization.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۷/۴ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۷/۲۰ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند. M.bagherian@Birjand.ac.ir

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند.

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند.

مقدمه

خشک‌شدن فرآیند پیچیده‌ای است که در آن انتقال حرارت و رطوبت به‌صورت همزمان رخ می‌دهد. این فرآیند تحت تأثیر پارامترهای دما، رطوبت و سرعت محیط (عوامل خارجی) و مقدار تخلخل‌ها و توزیع اندازهٔ ذرات (عوامل داخلی) است. اگرچه تغییرات خواص ماده و توزیع غیریکنواخت حرارت و رطوبت، شبیه‌سازی فرآیند را بسیار دشوار می‌کند، ولی با وجود این پیچیدگی‌ها ایجاد مدلی مطمئن برای توصیف فرآیند خشک‌شدن ضروری است. مطالعات فراوانی در زمینهٔ خشک‌شدن محصولات متخلخل انجام شده است، که هر یک مکانیزم‌های مختلفی از انتقال جرم را برای خشک‌شدن بیان نموده‌اند. براساس نظر محققان، انتقال رطوبت با مکانیزم‌های نفوذ مایع، نفوذ بخار، برون‌ریز (Effusion)، نفوذ حرارتی (Thermal Diffusion)، نیروهای منافذ مویین (Capillary Diffusion) و یا ترکیبی صورت می‌گیرد [1]. اگرچه همهٔ این مکانیزم‌ها از پایهٔ فیزیکی قوی برخوردار هستند، اما در اکثر تحقیقات، انتقال رطوبتی که به‌دلیل حرکت اتفاقی مولکول‌ها و نفوذ رطوبت رخ می‌دهد مکانیزمی غالب فرض شده است. طی این مکانیزم، انتقال رطوبت به سطح و تبخیر آن به‌دلیل وجود گرادیان رطوبت بین سطح جسم و داخل آن است که این توصیف توسط رابطهٔ فیک بیان می‌شود. بر این اساس کرانک [2] اطلاعات جامعی از مدل‌های انتقال جرم برای شکل‌های مختلف و شرایط مرزی متفاوت ارائه نموده است که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است [2].

ضریب نفوذ رطوبت به‌عنوان اصلی‌ترین عامل در فرآیندهای خشک‌شدن مورد استفاده قرار می‌گیرد و با محاسبهٔ این عامل می‌توان به توصیف مدل فرآیند به‌صورت ریاضی پرداخت و در راستای ایجاد محصولی سالم قدم برداشت. بر همین اساس اخیراً تعدادی از محققان بررسی‌هایی در این زمینه انجام دادند. افریمو [3] معادلهٔ نفوذ فیک را با شرایط و فرضیات خاصی برای چند نمونه مواد متخلخل حل کرد و نتایج را با داده‌های تجربی سایر محققان مقایسه نمود. آنها دریافت نمودند که افزایش درجهٔ حرارت، با افزایش ضریب نفوذ همراه است. واسیک و همکاران [7-4] چهار مدل مختلف برای توصیف فرآیند خشک‌شدن سرامیک رسی پیشنهاد داده‌اند، که در دو مدل اثرات انقباض لحاظ و در دو مدل دیگر از آن چشم‌پوشی شده است. در دو مدل اول، ضریب نفوذ به‌روش شیب از رابطهٔ ساده‌شدهٔ فیک محاسبه می‌شود و در دو مدل بعدی (که در راستای معادلات نفوذی افریمو بودند) ضریب نفوذ از مقایسهٔ مقادیر تحلیلی و تجربی به‌دست می‌آید. آنها نشان دادند که اعمال اثرات انقباض، دقیق‌تر شدن مدل ریاضی فرآیند را به‌همراه دارد که این نتیجه صرفاً با انجام هشت آزمایش به‌دست آمده است. زاگروبا و همکاران [8] با تحلیل معادلات بقا (انرژی، جرم، ممنوتوم) مطالعهٔ ارزشمندی در زمینهٔ تحلیل تنش، مقدار رطوبت محتوی و انقباض سرامیک رسی انجام داده‌اند و برای ضریب نفوذ رطوبت رابطهٔ آرنیوسی را پیشنهاد کرده‌اند. آنها با انجام پنج آزمایش پارامترهای این رابطه را تخمین زدند. چمخی و همکاران [9] ضریب نفوذ مؤثر رطوبت سه نوع مختلف گل را به‌صورت یک معادلهٔ درجه دوم برحسب رطوبت قطعه پیش‌بینی نمودند. این تحقیق با معرفی عدد فوریه و استفاده از معادله فیک صورت گرفت و اثرات درجهٔ حرارت و رطوبت محیط فقط با انجام پنج آزمایش بررسی شد و از اثرات سرعت محیط چشم‌پوشی کردند. ساندر و همکاران [10] با استفاده از شبکهٔ عصبی مقدار رطوبت و دمای نمونه نازکی از سرامیک را به‌صورت ریاضی مدل کردند. آنها دریافتند که تغییرات دمای خشک‌شدن و خاصیت‌های انتقال نمونه به‌صورت نمایی تغییر می‌کنند و مدلی نیز با نام خود به‌ثبت رساندند. آنها صرفاً اثرات دمای محیط را بر روی ضریب نفوذ مؤثر خشک‌شدن بررسی

نمودند. بولاود و محمید [11] تغییرات ضریب نفوذ مؤثر را روی مقره‌های الکتریکی با تغییر در ساختار ماده بررسی کردند. در این تحقیق آنها پی بردند که افزایش فیبر به مقره‌های سرامیکی، صرفاً تا حد مشخصی می‌تواند مقدار ضریب نفوذ را افزایش دهد و بعد از آن با افزایش فیبر، ضریب نفوذ ثابت باقی خواهد ماند.

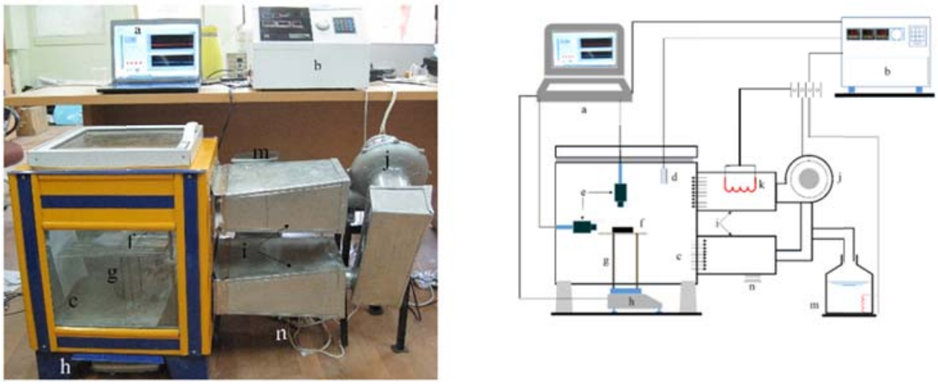
در تحقیق بخشی و همکاران [12] دو مکانیزم مختلف برای مراحل اول و دوم خشک‌شدن پیشنهاد شد. آنها دریافتند که در مرحلهٔ اول تبخیر از سطح و در مرحلهٔ دوم نفوذ رطوبت از داخل به سطح انجام می‌شود. آنها معادلهٔ فیک را با توجه به شرایط مرزی حاکم حل و مقادیر ضریب نفوذ را برای هر مرحله به‌صورت مجزا محاسبه و در نهایت با استفاده از اجزای محدود تنش و ترک‌های خشک‌شدن سیمان را در مرحلهٔ اول مطالعه کردند. خلیلی و همکاران [۱۳, ۱٤] خشک‌شدن سرامیک رسی را با استفاده از ماشین بینایی بررسی کردند. آنها اثرات ضخامت بر خشک‌کردن سرامیک رسی را مورد مطالعه قرار دادند و با اندازه‌گیری تنش تسلیم، تغییرات مدول یانگ را بررسی و در ادامه با معیار تسلیم فون میزز، رشد ترک را در حالت‌های مختلف دو و سه‌بعدی پیش‌بینی کردند [۱۵, ۱٦]. در این تحقیقات نشان داده شد که در رطوبت‌های کم به‌خاطر پایین بودن تنش تسلیم احتمال ترک نمونه بیشتر می‌شود. آنها در ادامه به مدل ریاضی انقباض قطعه پرداختند و نتایج را با مقادیر تجربی مقایسه کردند [۱۷, ۱۸].

تاکنون مطالعات محققان در زمینهٔ خشک‌شدن سرامیک و محاسبهٔ ضریب نفوذ براساس طراحی و انجام آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل نیست و اثر هر پارامتر و تقابل عوامل بر یکدیگر بررسی نشده است. این تحقیق با هدف محاسبهٔ ضریب نفوذ مؤثر در شرایط محیطی مختلف انجام شده‌است و در آن طراحی آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل صورت می‌گیرد. دما، رطوبت و سرعت محیط پارامترهای مورد بررسی هستند که هر یک در سه سطح انتخاب می‌شوند. طی هر آزمایش شرایط محیطی توسط سیستم کنترل ساخته شده، ثابت است و در هر آزمایش تغییرات دمای سطح قطعه توسط دوربین ترموگرافی ثبت می‌شود. مقدار ضریب نفوذ مؤثر از منحنی‌های خشک‌شدن و از دو روش شیب [21-19] و یا مقایسه مقادیر تحلیلی و تجربی [24-22] محاسبه می‌شود. در این تحقیق ضریب نفوذ با استفاده از روش دوم محاسبه می‌شود و هم‌چنین برای کاهش مقدار خطای مقایسه مقادیر تجربی و تحلیلی از الگوریتم بهینه‌سازی نوین کرم شب‌تاب استفاده شده است. این روش نسبت به سایر روش‌های جستجو دقیق‌تر است و تاکنون در خشک‌شدن مورد مطالعه قرار نگرفته است. بعد از محاسبه ضریب نفوذ مؤثر، تحلیل آماری و آنالیز واریانس انجام می‌شود تا اثرپذیری پارامترها مشخص شود. در ادامه با استفاده از رگرسیون معادله‌ای برای پیش‌بینی مقدار ضریب نفوذ مؤثر برحسب پارامترها ارائه شده است. با استفاده از این رابطه می‌توان مدل توصیفی فرآیند خشک شدن سرامیک رسی را بیان کرد و در راستای بهینه کردن فرآیند و تولید محصولات سرامیکی سالم گام برداشت. در انتها، نتایج این تحقیق با مقادیر ارائه شده در مطالعات سایر محققان مقایسه شده است.

مطالعات آزمایشگاهی

مواد و تجهیزات. آزمایش‌های تجربی در مرکز تحقیقات خشک‌شدن دانشگاه بیرجند انجام شد. بدین منظور خشک‌کنی مطابق شکل (۱) (راست) طراحی و سپس با همکاری تعدادی از دانشجویان برق و مکانیک این دانشگاه مانند شکل (۱) (چپ) ساخته شد. نام وکاربرد اجزای مختلف خشک‌کن به‌تفکیک به‌همراه مشخصهٔ لاتین آنها در جدول (۱) آورده شده است.

نمونهٔ سرامیک رسی بعد از تجزیه و تحلیل [۱۷] و رطوبت زدایی اولیه با عبور از مش ۲۰۰ (اندازهٔ ذرات ۷٤ میکرون‌متر)، یکنواختی اولیه برای مخلوط شدن با آب به اندازه ۲۰ ٪ (بر مبنای خشک) را پیدا کرد. برای ایجاد توزیع یکسان حرارت و رطوبت، ٢٤ ساعت بعد از ایجاد مخلوط اولیه، قالب‌گیری نمونه به‌شکل مکعب مستطیل انجام می‌شود. ابعاد داخلی محفظه خشک‌کن ٥٠٠×٤٠٠×٤٠٠mm است. هوا توسط بادزن (Blower) با سرعت مشخص از المنت حرارتی خشک ۲۰۰۰ واتی عبور کرده و گرم می‌شود. به‌منظور ایجاد هوای همگن در اطراف قطعه، یکنواخت‌کنندهٔ مکانیکی در ورودی خشک‌کن نصب شده است.

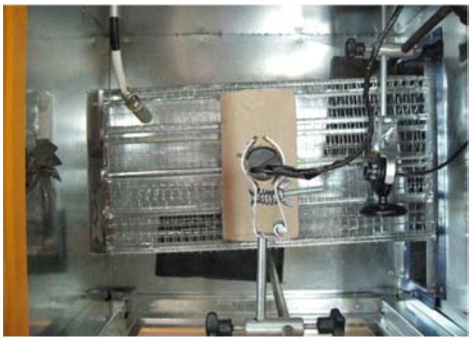


شکل ۱ دیاگرام خشک‌کن طراحی شده (سمت چپ) و خشک‌کن ساخته‌شده و تجهیزات علامت‌گذاری شده در آن (سمت راست)

جدول ۱ لیست تجهیزات مورد استفاده در خشک‌کن به همراه کاربرد آن

مشخصه	نام و ویژگی‌ها	کاربرد
a	کامپیوتر با سیستم عامل ویندوز ۸	ذخیرهٔ تصاویر دوربین‌ها، ذخیره جرم، کنترل سیستم
b	سیستم کنترل	تأمین شرایط آزمایش
c	محفظهٔ خشک‌کن	ایجاد فضایی عایق
d	سنسور دما و رطوبت با دقت ۱ °C ± و ٪۵±	بازخورد به سیستم کنترل
e	دوربین	ثبت تصاویر انقباض
f	نمونهٔ مورد آزمایش	بررسی رفتار خشک شدن
g	پایهٔ نگهدارندهٔ نمونه	انتقال کاهش وزن نمونه
h	ترازو با دقت ۰.۰۱ گرم و ظرفیت ۳۰۰۰ گرم	ثبت وزن با قابلیت اتصال به کامپیوتر
i	کانال هوا	ورود و خروج هوا
j	دمنده	ایجاد هوا با سرعت‌های مختلف
k	هیتر ۲۰۰۰ وات	گرم کردن هوا حین گردش در سیستم
m	بخارساز	تأمین رطوبت تنظیم شده
n	المان سردکننده	کاهندهٔ دما و رطوبت

مقدار رطوبت مورد نیاز محیط خشک‌کن توسط دستگاه بخور تأمین می‌گردد. شدت جریان هوا توسط دیمر و مقدار درجهٔ حرارت و رطوبت توسط سنسور SHT7x کنترل می‌شود. این سنسور هر سه ثانیه یک بار مقدار درجهٔ حرارت و رطوبت را اندازه‌گیری و به سیستم کنترل ارسال می‌کند. در صورت عدم تطابق با نقطهٔ تنظیمی دستورات لازم از سمت سیستم به اجزای مربوطه ارسال می‌شود. در کانال خروجی هوا، هیت سینکی نصب شده است و در صورتی که درجهٔ حرارت و یا رطوبت محفظه بیشتر از مقدار تنظیمی باشد، فعال می‌شود. نمونهٔ مورد مطالعه روی سینی مشبکی داخل خشک‌کن قرار می‌گیرد. این سینی توسط پایه‌هایی به ترازوی زیر محفظه متصل است. هدف از این نحوه چیدمان آن است که اولاً جریان هوا بر روی تغییرات وزن نمونه بی‌تأثیر باشد ثانیاً زیر قطعه نیز در معرض هوای گرم قرار گیرد.



شکل ۲ نمایی از قطعهٔ داخل خشک‌کن

تغییرات جرم نمونه را حین خشک‌شدن می‌توان با این ترازو کنترل کرد. ترازو با کابل R232 به کامپیوتر متصل می‌باشد و به‌گونه‌ای تنظیم شده است که هر پنج دقیقه یک‌بار وزن نمونه را ثبت می‌کند. کاهش ابعاد نمونه و رفتار انقباضی آن توسط دو دوربین کنترل می‌شود. این دوربین‌ها به کامپیوتر متصل‌اند و با نرم‌افزار لب‌ویو کنترل می‌شوند و هر پنج دقیقه یک‌بار تصاویر بالایی و جانبی قطعه را ثبت می‌کنند. خشک‌کن ساخته‌شده قابلیت ایجاد دما در محدودهٔ °C ۰.۱±۱۲۰-۰ رطوبت نسبی ۵٪±۹۹-۲۵ و سرعت جریان m/s ۰.۲ ±۵-۰ را دارد. شکل (۲) نمایی از داخل خشک‌کن را نشان می‌دهد.

طراحی آزمایش‌ها. در این تحقیق درجهٔ حرارت (C ° ۴۰-۶۰-۸۰)، رطوبت نسبی (٪۳۰-۵۰-۷۰) و سرعت جریان هوا (ms^{-1} ۱-۲-۳) به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر ضریب نفوذ مؤثر در نظر گرفته می‌شود و اثرات آنها بر رفتار خشک‌شدن سرامیک و ضریب نفوذ بررسی شده است. در جدول (۲) سطوح مربوط به هریک به‌همراه علامت اختصاری آن آورده شده است. به‌منظور بررسی تمامی احتمالات و تعیین دقیق ضریب تأثیر هر پارامتر و تقابل آنها بر یکدیگر و فرآیند، آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل و مطابق جدول (۳) طراحی شد. در هر آزمایش ابتدا پارامترهای دستگاه براساس جدول (۳) تنظیم می‌شود و بعد از آن‌که خشک‌کن به مقادیر مورد نظر رسید، قطعه داخل آن قرار می‌گیرد و آزمایش شروع می‌شود. به‌محض قرار دادن قطعه داخل خشک‌کن، تغییرات جرم و تغییرات ابعادی به‌ترتیب توسط ترازو و دوربین‌های متصل به کامپیوتر ثبت می‌شود و با صفر شدن تغییرات جرم نمونه آزمایش به اتمام می‌رسد و مقدمات آزمایش بعدی فراهم خواهد شد. با توجه به اینکه طی خشک‌شدن، رطوبت با مکانیزم‌های مختلف از طریق نفوذ مایع، نفوذ بخار، برون ریز (نادسن)، نفوذ حرارتی و یا نیروهای منافذ مویین منتقل می‌شود، تاکنون توضیح دقیقی در ارتباط با خروج رطوبت بیان نشده است. طبق گفتهٔ محققان از بین مکانیزم‌های فوق، نفوذ رطوبت براساس حرکات اتفاقی مولکول‌های آب، مکانیزم غالبی در خشک‌شدن فرض شده است. طی این فرضیه رطوبت در مرحلهٔ اول خشک‌شدن بر اثر نفوذ مولکولی به سطح منتقل می‌شود و در ادامه از سطح تبخیر می‌شود. این فرض توسط پدیدآورندگان تحقیق با انجام آزمایش‌های ترموگرافی اثبات شد.

بدین منظور علاوه بر ۲۷ آزمایش فوق، آزمایش‌های دیگری نیز تحت عنوان ترموگرافی سطح، برای بررسی تغییرات درجهٔ حرارت سطح نمونه انجام شد تا با تحلیل نمودارهای حاصل از ترموگرافی و نمودارهای خشک‌شدن، مکانیزم غالب شناسایی شود.

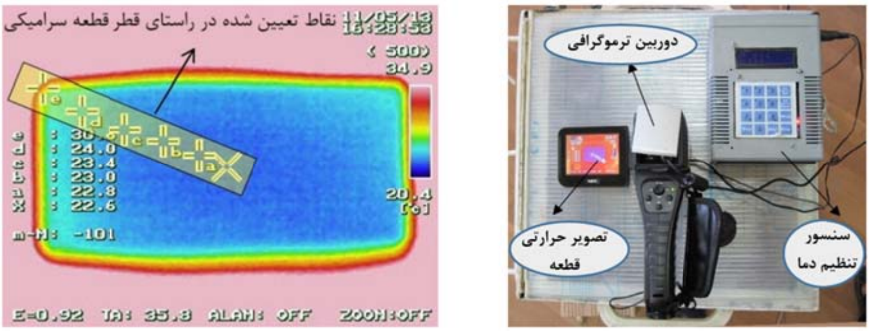
دمانگاری سطح قطعه. علاوه بر ۲۷ آزمایش فوق، آزمایش‌های تجربی دیگری نیز انجام شد. در این آزمایش‌ها فقط درجهٔ حرارت به‌عنوان پارامتر فرآیند در نظر گرفته شد. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی ارتباط درجهٔ حرارت سطح قطعه و دمای محیط بود که تحت عنوان آزمایش‌های ترموگرافی انجام شد. در این آزمایش‌ها از یک دوربین حرارتی مدل ترمو تریسر جی۱۰۰ استفاده شد. برای بررسی تغییرات دمای سطح، پنج نقطه در قسمت‌های مختلف صفحه تصویر دوربین مانند شکل (۳) ایجاد گردید تا با ثبت دمای این نقاط طی بازه‌های زمانی مختلف، نمودارهای تغییر دمای سطح برحسب زمان ترسیم شوند. بدین منظور دوربین حرارتی در بالای قطعه به‌نحوی تنظیم شد که هر یک دقیقه یک‌بار عکس حرارتی بگیرد و ذخیره کند. نمونه‌هایی از تصاویر ترموگرافی در شکل (٤) نشان داده شده است. در ادامه با انتقال تصاویر از دوربین به کامپیوتر، مقادیر دمای پنج نقطه و زمان آن از تصاویر حرارتی استخراج و در یک فایل صفحه‌گسترده ثبت شد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان نمودار ترموگرافی را ترسیم نمود. نمونه‌ای از این نمودارها در شکل (۵) نشان داده شده است که تحلیل آن در بخش بعدی ارائه شده است.

جدول ۲ پارامترها و سطوح مورد بررسی در آزمایش‌های تجربی

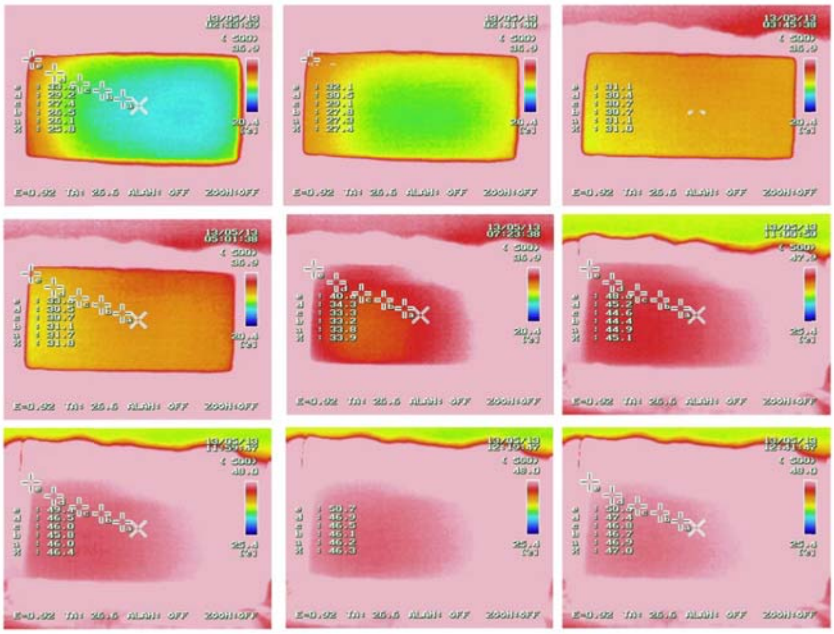
پارامتر	علامت	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
رطوبت نسبی (٪)	RH	۳۰	۵۰	۷۰
دمای محیط (°C)	T	٤۰	٦۰	۸۰
سرعت محیط (ms^{-1})	V	۱	۲	۳

جدول ۳ طراحی آزمایش‌ها

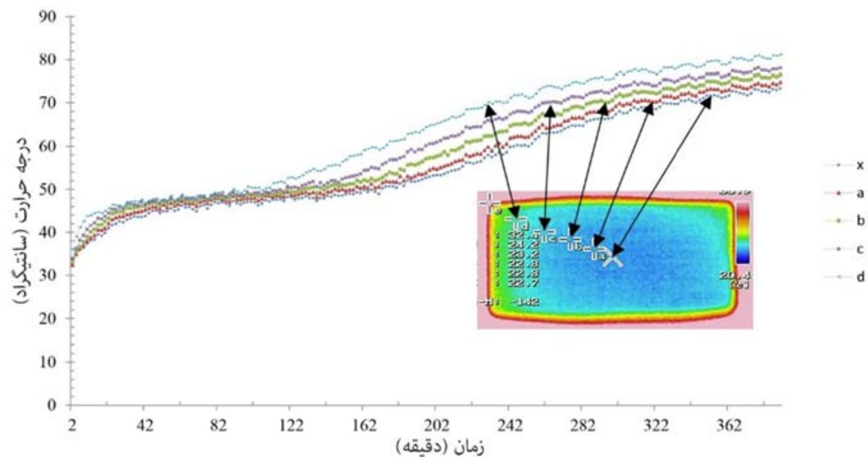
شمارهٔ آزمایش	T	RH	V	شمارهٔ آزمایش	T	RH	V	شمارهٔ آزمایش	T	RH	V
۱	٤۰	۳۰	۱	۱۰	٦۰	۳۰	۱	۱۹	۸۰	۳۰	۱
۲	٤۰	۳۰	۲	۱۱	٦۰	۳۰	۲	۲۰	۸۰	۳۰	۲
۳	٤۰	۳۰	۳	۱۲	٦۰	۳۰	۳	۲۱	۸۰	۳۰	۳
٤	٤۰	۵۰	۱	۱۳	٦۰	۵۰	۱	۲۲	۸۰	۵۰	۱
۵	٤۰	۵۰	۲	۱٤	٦۰	۵۰	۲	۲۳	۸۰	۵۰	۲
٦	٤۰	۵۰	۳	۱۵	٦۰	۵۰	۳	۲٤	۸۰	۵۰	۳
۷	٤۰	۷۰	۱	۱٦	٦۰	۷۰	۱	۲۵	۸۰	۷۰	۱
۸	٤۰	۷۰	۲	۱۷	٦۰	۷۰	۲	۲٦	۸۰	۷۰	۲
۹	٤۰	۷۰	۳	۱۸	٦۰	۷۰	۳	۲۷	۸۰	۷۰	۳



شکل ۳ نمایش دوربین ترموگرافی بر روی خشک‌کن (راست)، تصویر حرارتی دوربین (چپ)



شکل ٤ ترموگرافی سطح در ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد



شکل ۵ ترسیم نمودار تغییرات دمای سطح با استفاده از ترموگرافی در محیط ۷۵ درجه

محاسبهٔ ضریب نفوذ مؤثر

توصیف انتقال رطوبت از داخل نمونـه بـه سـطح آن و سپس تبخیر از سطح به‌دلیل وجود گرادیان رطوبت بین سطح جسم و داخل آن است و توسط رابطهٔ فیک بیـان می‌گردد. چنان‌چه ضریب نفـوذ متغیـر فـرض شـود از رابطه فیک (۱) و در صورت ثابت فرض شدن ضـریب نفوذ از رابطه فیک (۲) برای توصیف رفتار خشک‌شدن استفاده می‌شود. در این تحقیق ضریب نفـوذ متغیـر در نظر گرفته شده است و نحوهٔ تغییرات آن از منحنی‌های خشک‌شـدن تجربـی بـه روش‌هـای مختلـف محاسـبه می‌شود [5].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = Div(Dgrad\ M) \tag{۱}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}) \tag{۲}$$

محققان بـه‌منظـور افـزایش دقـت مـدل، بـه‌جـای استفاده از ضـریب نفـوذ (D)، از عامـل ضـریب نفـوذ مؤثر (D_{eff}) استفاده می‌کننـد [26-23 ,7 , 6]. در ایـن ضـریب خـواص مولکـولی، نفـوذ نادسـن، حرکـت مـوییگی، نفـوذ بخـار و نیـز مکـانیزم‌هـای جریـان هیدرولیکی گنجانیده شده است. یعنی همهٔ مکانیزم‌ها و نیروهای لازم برای انتقال رطوبت بـا یکـدیگر ترکیـب شده‌اند که تحـت عنـوان ضـریب نفـوذ مـؤثر معرفـی می‌گـردد و رابطـهٔ (۱) بـه‌صـورت رابطـهٔ (۳) حاصـل می‌شود:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \nabla M) \tag{۳}$$

کرانـک معادلـهٔ فیـک رابطـهٔ (۳) را بـرای مسـائل یک‌بعدی به‌صورت رابطه (٤) حل نموده است [2]:

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)\pi^2} \exp(\frac{-D_{eff}(2n-1)^2\pi^2 t}{(2L)^2}) \tag{٤}$$

در ایـن رابطـه MR نسـبت رطوبـت (Moisture Ratio) است و از مقادیر تجربی حاصل مـی‌شـود [3]. مقدار MR در شروع فرآیند یک و بـا کـاهش رطوبـت مقدار آن به صفر می‌رسد. رابطهٔ (٤) در اکثر مطالعـات محققـان در خشـک‌شـدن محصـولات سـرامیکی و غیرسـرامیکی اسـتفاده شـده اسـت و تـاکنون مبنـای محاسبات ضریب نفوذ مؤثر این رابطه است، اما روش‌های استخراج ضریب نفوذ از این رابطه متفاوت است. برخی محققان [21-19] با انتخاب زمان طولانی، سمت راست سری رابطهٔ (٤) را به‌صورت رابطـهٔ (٥) همگـرا کردند:

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_{eff}\pi^2 t}{(2L)^2}\right) \tag{٥}$$

آنها با معرفی پارامتر ثابت c به‌صورت رابطـهٔ (٦)، مقدارMR را برحسب زمان تخمین زدند و ضریب نفوذ را محاسبه نمودند (رابطهٔ ۷).

$$c = \frac{D_{eff}\pi^2}{(2L)^2} \tag{٦}$$

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \mathcal{R} \exp(-ct) \tag{۷}$$

این روش محاسـبه بـه نـام روش شـیب معـروف است و از آنجا که برای هر آزمایش یـک مقـدار بـرای ضریب نفوذ مؤثر حاصل می‌شود روش دقیقی نیسـت. در این مطالعـه از روش دیگـر محاسـبهٔ ضـریب نفـوذ استفاده شده است که برخلاف روش قبلی در هر زمـان t یک مقدار برای ضریب نفوذ حاصل می‌شود. در ایـن روش ابتدا با انتخاب ضریب نفوذ اولیهٔ D_0 مقادیر MR بـا اسـتفاده از رابطـهٔ (٤) محاسـبه و در ادامـه بـا MR تجربی مقایسه می‌شود. مقـدار خطـای MR تحلیلـی و تجربی به‌صورت رابطهٔ (۸) است.

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{i=n} (MR_{analitical} - MR_{exprimental})^2 \tag{۸}$$

مقادیر ضریب نفوذ مؤثر بهینه با هدف کاهش خطا توسط الگوریتم کرم شب‌تاب برای هر زمان محاسبه خواهد شد. به‌منظور افزایش دقت در محاسبات، اثرات انقباض نیز در رابطهٔ (٤) توسط معرفی L_t به‌جای L اعمال گردید و مقدار طول هر لحظهٔ قطعه با استفاده از پردازش تصویر محاسبه و مقدار آن در رابطهٔ (٤) قرار داده شد.

الگوریتم کرم شب‌تاب. از آن‌جا که ضریب نفوذ مؤثر به‌صورت غیرخطی تغییر می‌کند، بنابراین برای یافتن جواب‌های بهینه به الگوریتم‌های بهینه‌سازی مؤثر و کارا نیاز است. در این تحقیق محاسبهٔ مقادیر ضریب نفوذ بهینه توسط الگوریتم تازه گسترش‌یافتهٔ کرم شب‌تاب انجام می‌شود که در آن تابع هدف به‌صورت رابطهٔ (۸) تعریف شده است.

این الگوریتم بر مبنای هوش جمعی و الهام گرفته از طبیعت کرم شب‌تاب در نحوهٔ ساطع کردن نور خود به‌دست آمده است و هدف اولیهٔ کرم شب‌تاب از ساطع کردن نور به مانند یک سیستم علامت‌دهی برای جذب کرم‌های شب‌تاب دیگر است که نخستین بار توسط یانگ در سال ۲۰۰۸ براساس فرضیه‌های زیر ارائه گردید [27]:

الف- کرم‌های شب‌تاب فاقد جنسیت می‌باشند، بنابراین یک کرم شب‌تاب می‌تواند توسط تمامی کرم‌های شب‌تاب دیگر جذب شود.

ب- جذابیت متناسب با نور کرم است و برای هر دو کرم شب‌تاب، کرم با نور کمتر جذب کرم با نور بیشتر می‌شود (به سمت آن حرکت می‌کند)، با افزایش مسافت کاهش نور کرم شب‌تاب نیز در نظر گرفته می‌شود.

ج- اگر هیچ کرم شب‌تاب نورانی‌تری نباشد، کرم شب‌تاب به‌صورت تصادفی حرکت خواهد کرد.

د- روشنایی باید با تابع هدف در ارتباط باشد.

جذابیت یک کرم شب‌تاب براساس درخشندگی یا شدت نوری تعیین می‌شود که از تابع هدف به‌دست آمده است. در ساده‌ترین حالت برای مسائل بهینه‌سازی که در آن مقدار بیشینهٔ تابع هدف به‌دست می‌آید، بیشینهٔ روشنایی "I" یک کرم شب‌تاب در مکان منحصر به فرد X می‌تواند مقدار روشنایی با تابع هدف متناسب شود ($I(x) \propto f(x)$). با این حال جذابیت، "β" کاملاً نسبی است و باید در چشمان ناظر دیده شود و یا توسط کرم‌های شب‌تاب دیگر قضاوت شود. بنابراین، جذابیت با مسافت r_{ij} بین کرم شب‌تاب i و کرم شب‌تاب j تغییر می‌کند. شدت نور با افزایش فاصله از منبع‌اش کاهش می‌یابد، و نور در محیط نیز جذب می‌شود بنابراین باید اجازه داده شود جذابیت با درجهٔ جذب تغییر کند [28].

در ساده‌ترین حالت شدت نور $I(r)$ با مسافت r به‌طور پیوسته و نمایی تغییر می‌کند. بیان ریاضی تغییرات شدت نور در رابطهٔ (۹) آمده است [28].

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \qquad (۹)$$

I_0 شدت نور اولیه و γ ضریب جذب نور است. میزان جذب کرم شب‌تاب با شدت نوری که از کرم‌های شب‌تاب اطراف ساطع می‌شود متناسب است. اکنون می‌توان مقدار جذابیت یک کرم شب‌تاب β را طبق رابطهٔ (۱۰) تعریف نمود [28].

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \qquad (۱۰)$$

شبه کد الگوریتم کرم شب‌تاب که در آن β_0 مقدار جذابیت در مسافت صفر است در شکل (٦) نمایش داده شده است.

```
Firefly Algorithm
Objective function f(x),    x = (x_1, ..., x_d)^T
Initialize a population of fireflies x_i (i = 1, 2, ..., n)
Define light absorption coefficient γ
while (t <MaxGeneration)
for i = 1 : n all n fireflies
  for j = 1 : i all n fireflies
    Light intensity I_i at x_i is determined by f(x_i)
    if (I_j > I_i)
    Move firefly i towards j in all d dimensions
    end if
    Attractiveness varies with distance r via exp[−γr]
    Evaluate new solutions and update light intensity
  end for j
end for i
Rank the fireflies and find the current best
end while
Postprocess results and visualization
```

شکل ٦ شبه کد الگوریتم کرم شب‌تاب [29]

فرآیند بهینه‌سازی این الگوریتم از تغییرات شدت نور و جذابیت استقاده می‌نماید. فاصلهٔ بین هر دو کرم شب‌تاب i و j در X_i و X_j را می‌توان از مختصات کارتزین طبق رابطهٔ (۱۱) به‌دست آورد.

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{n}(X_{i,k} - X_{j,k})^2} \qquad (۱۱)$$

$X_{i,k}$ جزء k از کرم شب‌تاب i

در این الگوریتم کرم‌های شب‌تاب به‌سمت کرم‌های با جذابیت بیشتر حرکت می‌کنند. در هر مرحله میزان جابه‌جایی کرم جذب‌شدهٔ i به سوی کرم شب‌تاب جذابتر (روشن تر) j توسط رابطهٔ (۱۲) تعیین می‌شود [28].

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}(x_i - x_j) + \alpha\varepsilon_i \qquad (۱۲)$$

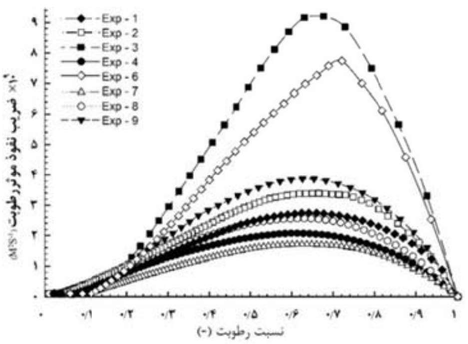
قسمت دوم رابطه با جذب در ارتباط است، در حالی‌که قسمت سوم تصادفی است که با بردار تصادفی ε_i تغییر می‌کند که از توزیع نرمال تبعیت می‌کند. در اکثر کاربردها می‌توان مقادیر $\beta_0=1$، $\gamma=1$ و $\alpha \in [0,1]$ را در نظر گرفت. پارامتر γ تغییر جذابیت را مشخص می‌کند، و مقدار آن مشخص کنندهٔ تعیین سرعت هم‌گرایی و چگونگی رفتار الگوریتم کرم شب‌تاب است. در تئوری $\gamma \in [0,\infty)$ اما در عمل 1 یا $\gamma = 0$ توسط سیستمی که باید بهینه شود تعیین می‌شود. در نهایت زمانی‌که $\gamma = 0$، جذابیت ثابت است و $\beta = \beta_0$. در واقع مانند این است که گفته شود شدت نور در یک فضای ایده‌آل کاهش نمی‌یابد. بنابراین یک کرم شب‌تاب روشن می‌تواند در هر جایی از ناحیهٔ دامنه دیده شود. بنابراین یک نقطهٔ بهینه (معمولاً بهینهٔ عمومی) می‌تواند به‌راحتی قابل دسترس شود که مطابق با یک حالت خاص الگوریتم پرواز پرندگان است [27].

بحث و نتایج

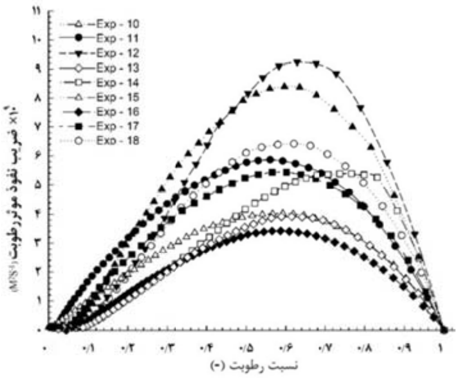
ضریب نفوذ مؤثر سرامیک رسی طی خشک‌شدن از نسبت‌های رطوبت MR آزمایش‌های تجربی در شرایط مختلف و با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب محاسبه گردید. نمودار تغییرات ضریب نفوذ در طی کاهش MR برای این آزمایش‌ها در شکل‌های (۹-۷) آمده است. از این نمودارها و سایر داده‌های تجربی می‌توان در راستای تحلیل فرآیند استفاده نمود. در این نمودارها مشخص است که در ابتدای فرآیند، مقدار ضریب نفوذ

مؤثر تقریباً صفر است. این مرحله، مرحلهٔ پیش‌گرم (Preheating) قطعه است. سرعت خشک‌شدن و ضریب نفوذ در مرحلهٔ گرم‌شدن ناچیز و قابل چشم‌پوشی است به‌همین خاطر حجم اندکی از رطوبت قطعه تبخیر می‌شود و مقدار انقباض گزارش‌شده نیز ناچیز است.

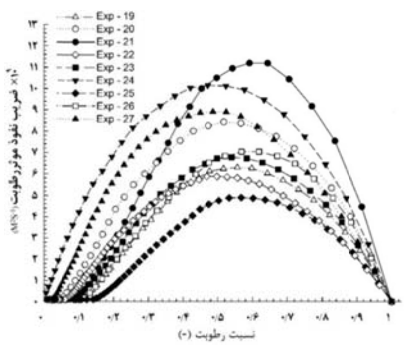
در این مرحله، سطح ماده از دمای اولیهٔ خود تا رسیدن به دمای حباب تر گرم می‌شود. در شکل (۱۰) که تغییرات دمای سطح قطعه آورده شده است نیز می‌توان طول مرحلهٔ گرم شدن اولیهٔ قطعه را دید (نقطهٔ A). ضریب نفوذ بعد گذر از مرحلهٔ گرم شدن اولیه، با کاهش MR به‌صورت خطی افزایش می‌یابد تا این‌که در یک MR مشخص به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این دوره، به‌عنوان مرحلهٔ سرعت ثابت خشک‌شدن تلقی می‌شود. در این مرحله سطح ماده به‌صورت پیوسته با لایه‌ای از آب پوشیده می‌شود و با تبخیر رطوبت از سطح، رطوبت داخلی قطعه جایگزین رطوبت تبخیر شده از سطح می‌شود و بدین ترتیب سطح قطعه همواره اشباع نگه داشته می‌شود. به‌همین دلیل درجهٔ حرارت سطح قطعه در این مرحله ثابت و برابر مقدار درجهٔ حباب تر محیط است (فاصله A تا B در شکل ۱۰). محققان این مرحله را مانند تبخیر آب از یک ظرف پرآب فرض کرده‌اند [12].



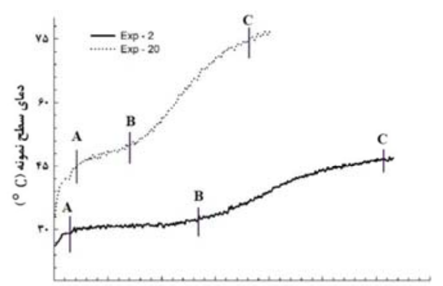
شکل ۷ تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در برابر نسبت رطوبت برای آزمایش ۱ تا ۹



شکل ۸ تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در برابر نسبت رطوبت برای آزمایش ۱۰ تا ۱۸

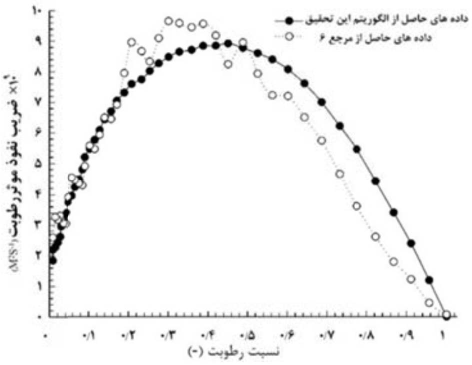


شکل ۹ تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در برابر نسبت رطوبت برای آزمایش ۱۹ تا ۲۷



شکل ۱۰ نمودار ترموگرافی سطح خشک شدن سرامیک رسی

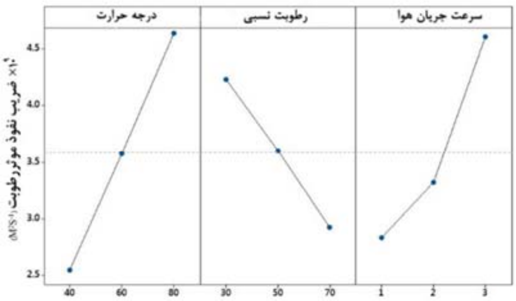
به‌دلیل پدیدهٔ مویینگی مرحلهٔ اول همواره با انقباض همراه است [30] و ثابت شده است که تغییر حجم ماده برابر با حجم رطوبت تبخیرشده از سطح ماده است. در انتهای این مرحله فشار مویینگی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و احتمال ایجاد ترک در این نقطه زیاد است [31]. علاوه بر آن افزایش سرعت خروج بخار آب از میان ساختار متخلخل بر اثر افزایش درجهٔ حرارت نیز باعث ترک قطعه می‌شود. جایگزینی آب تبخیر شده با آب داخل قطعه در مرحلهٔ اول توسط چند مکانیزم مختلف توصیف می‌شود [6]. اشباع ماندن منافذ مویین و اختلاف پتانسیل مویینگی، انتقال رطوبت به‌صورت مایع و کاهش MR را به‌همراه دارد. با پیشرفت فرآیند مقدار MR هم‌چنان کمتر شده و دمای سطح قطعه نیز به‌تدریج بالا می‌رود. در این مرحله دیگر سطح قطعه کاملاً اشباع نیست و مقداری سطوح خشک روی سطح قطعه نمایان می‌شود (نقطهٔ B). این نقطه به‌عنوان نقطهٔ بحرانی بالایی تلقی می‌شود که نمایانگر شروع انتقال رطوبت از حالت بندی (funicular) به حالت آونگی (pendular) است. رسیدن به این نقطه به عواملی نظیر نرخ خشک‌شدن، ضخامت نمونه، درجهٔ حرارت محیط و رطوبت آن وابسته است. در این مرحله درجهٔ حرارت محیط و خواص سرامیک تأثیر زیادی بر خروج و انتقال رطوبت باقی‌مانده از قطعه دارند. در حالت بندی بین رطوبت نمونه پیوستگی مایع وجود دارد و حرکت مایع به طرف سطح خارجی ماده، از طریق مویینگی صورت می‌گیرد. هنگامی‌که آب به‌سمت سطح خارجی ماده حرکت می‌کند پیوستگی مایع در سوراخ‌های ماده از بین می‌رود و هوا به داخل این سوراخ ها مکیده می‌شود و حالت دوم یعنی حالت آونگی را به‌وجود می‌آورد. در این صورت انتقال رطوبت از سوراخ‌های مویین فقط به‌صورت موضعی امکان‌پذیر است و مقدار ضریب نفوذ با کاهش MR، کاهش می‌یابد. با پیشرفت فرآیند مقدار سطوح تر از سطح قطعه کاملاً از بین می‌رود و حباب‌های گازی باعث عدم پیوستگی رطوبت در منافذ خواهد شد. نقطهٔ C که نقطهٔ رطوبت بحرانی پایینی نامیده می‌شود، مشخص‌کنندهٔ انتهای انتقال از حالت بندی به آونگی است و هم‌زمان با آن خشک‌شدن متوقف می‌شود و ضریب نفوذ رطوبت به‌سمت صفر میل می‌کند. برای تأیید نتایج این تحقیق، از داده‌های موجود در مرجع [6] استفاده شده است. بدین منظور ابتدا با استفاده از نرم‌افزار تحلیل نمودار از روی تصویر، داده‌های MR و ضریب نفوذ از تصاویر موجود در مطالعهٔ مرجع [6] استخراج شد و در ادامه با استفاده از آنها مقادیر ضریب نفوذ به‌روش الگوریتم کرم شب‌تاب محاسبه شد که مقایسهٔ این دو مقدار در شکل (۱۱) آمده است. بدین علت که از تغییرات انقباض قطعهٔ مرجع [6] طی خشک‌شدن آن، اطلاعی در دست‌رس نبود، در مرحلهٔ اول خشک‌شدن بین دو روش تطابق ۱۰۰ ٪ اتفاق نیفتاد. اما در مقابل در مرحلهٔ دوم خشک‌شدن که انقباض بی‌تأثیر است، انطباق مقادیر ضریب نفوذ دو روش در حد قابل قبول گزارش شد.



شکل ۱۱ مقایسه تحقیق جاری و مرجع [6]

به‌منظور تعیین اثرگذاری هر پارامتر بر ضریب نفوذ مؤثر، تحلیل‌های آماری نیز به‌کمک نرم‌افزار مینی‌تب انجام شد. در شکل (۱۲) نمودار اثرگذاری سه پارامتر بر ضریب نفوذ مؤثر آمده است و از آن می‌توان

درک نمود که درجهٔ حرارت و سرعت جریان هوا رابطهٔ مستقیم و رطوبت نسبی رابطهٔ معکوس با ضریب نفوذ دارند. از شیب هر نمودار در این شکل می‌توان دریافت که بیشترین تأثیر بر ضریب نفوذ مؤثر را به‌ترتیب دمای محیط، سرعت جریان هوا و رطوبت نسبی محیط به خود اختصاص داده‌اند.



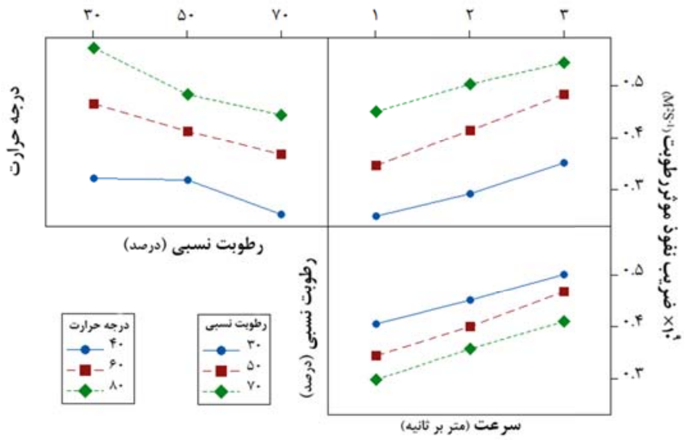
شکل ۱۲ نمودار اثرگذاری پارامترهای خشک‌کن بر سرعت خشک‌شدن قطعه

لازم به ذکر است که در تحلیل اثرگذاری، میانگین ضریب نفوذ مؤثر هر آزمایش لحاظ گردید که مقادیر آنها برای هر آزمایش در جدول (٤) آمده است. در جدول (٤) بیشترین مقدار ضریب نفوذ و سرعت تبخیر متعلق به آزمایش ۲۱ و کمترین مقدار متعلق به آزمایش ۷ است.

با توجه به اهمیت ضریب نفوذ در مدل‌سازی فرآیند خشک‌شدن ایجاد رابطهٔ تجربی بین ضریب نفوذ مؤثر و پارامترهای خشک‌شدن ضروری است؛ تا بتوان این پارامتر را در شرایط مختلف محیطی بدون انجام آزمایش‌ها پیش‌بینی نمود. این رابطه با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی و آنالیز واریانس قابل انجام است. بدین جهت ابتدا تحلیل اثرگذاری پارامترها بر یکدیگر انجام شد تا مشخص شود آیا پارامترها به‌صورت مستقل یا وابسته از یکدیگر عمل می‌کنند. در شکل (۱۳) این تحلیل انجام شد و با توجه به موازی بودن خطوط در شرایط مختلف می‌توان استنباط نمود که پارامترهای مورد بررسی هیچ تقابلی بر یکدیگر ندارند و مستقل از هم عمل می‌کنند.

جدول ٤ متوسط ضریب نفوذ مؤثر و سرعت خشک‌شدن برای ۲۷ آزمایش

شمارهٔ آزمایش	نرخ خشک‌شدن gr/min	ضریب نفوذ $(m^2/s)\times10^{-9}$	شمارهٔ آزمایش	نرخ خشک شدن gr/min	ضریب نفوذ $(m^2/s)\times10^{-9}$	شمارهٔ آزمایش	نرخ خشک‌شدن gr/min	ضریب نفوذ $(m^2/s)\times10^{-9}$
۱	۰/۰٤۱۳	۲/۰۸۳۲	۱۰	۰/۰۸۰۰	۳/۳۱۱۸	۱۹	۰/۱۰۱۷	٤/٤٤٥٥
۲	۰/۰٦۹۷	۲/٤۱۰۸	۱۱	۰/۰۹٤٤	۳/۸۳۵۰	۲۰	۰/۱۲٤۸	٥/٤۱۰٤
۳	۰/۰۸٦۷	٤/٤۸٥٦	۱۲	۰/۱۰٦	٥/٥۹۹۷	۲۱	۰/۱۳۳۳	٦/٥۳۸٤
٤	۰/۰۳۷۱	۱/٦۲۲۱	۱۳	۰/۰٦۹۷	۲/۸۰۱۸	۲۲	۰/۰۹۷۷	٤/۳۲۱٦
٥	۰/۰٤٦۰	۱/۹۹۱۸	۱٤	۰/۰۸۹٤	۳/۸۳۲٥	۲۳	۰/۱۰۷۳	٤/۳٦۲۲
٦	۰/۰٦۷۲	٤/۰۷۷٤	۱٥	۰/۰۹۱۹	٤/۳٥۲٥	۲٤	۰/۱۲٥۸	٥/۲۷۳۳
۷	۰/۰۳٦٦	۱/۳۸۹٤	۱٦	۰/۰٦۰۷	۲/۲۸۸۹	۲٥	۰/۰۹۲٤	۳/۲۰۰٤
۸	۰/۰٤٥۱	۱/۹۸۳۲	۱۷	۰/۰٦۷۱	۲/۳۷۸۷	۲٦	۰/۰۹۹۱	۲/٦٦٥۲
۹	۰/۰٤٥٦	۲/۸۲٦۷	۱۸	۰/۰۸٦۳	۳/۷٤۸٤	۲۷	۰/۱۱۲٥	٤/٥۸۰۸



شکل ۱۳ نمودار تقابل پارامترها بر یکدیگر برای ضریب نفوذ

به همین دلیل رابطهٔ رگرسیونی میانگین ضریب نفوذ مؤثر صرفاً برحسب سه پارامتر مستقل دمای محیط، سرعت جریان هوا و رطوبت نسبی به‌صورت رابطهٔ (۱۳) ایجاد می‌شود.

$$D_{eff} \times 10^9 = 0.05479\, T - 0.03101\, RH + 0.9194\, V \qquad (۱۳)$$

در این رابطه T، RH و V به‌ترتیب درجهٔ حرارت محیط، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا هستند. با استفاده از رابطهٔ (۱۳) می‌توان تخمینی از ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برحسب پارامترهای خشک‌شدن در راستای مدل‌سازی فرآیند داشت.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثرات متغیرهای خشک‌شدن شامل درجهٔ حرارت محیط، رطوبت نسبی محیط و سرعت وزش هوا (هر یک در سه سطح) بر ضریب نفوذ مؤثر یک قطعه سرامیک رسی بررسی شده است. برای متغیرهای فوق، آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل طراحی و در آزمایشگاه خشک‌شدن دانشگاه بیرجند انجام شد. هدف از این آزمایش‌ها محاسبهٔ نسبت رطوبت بود که برای هر آزمایش از وزن کردن نمونه در بازه‌های پنج‌دقیقه‌ای به‌دست آمد. طبق مطالعات تجربی دیگری که توسط ترموگرافی سطح انجام شد، صحت مدل نفوذ فیک برای خشک‌شدن قطعات مکعبی سرامیکی بررسی شد. با مقایسهٔ نسبت رطوبت به‌دست آمده بین روش تجربی و رابطهٔ تحلیلی و هم‌چنین کمینه نمودن مجموع مربعات خطا، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب محاسبه شد. در این تحقیق توصیف انتقال رطوبت با مکانیزم نفوذ و توسط قانون دوم فیک بیان گردید.

تحلیل‌های آماری میانگین ضریب نفوذ مؤثر نشان داد که پارامترهای دما، سرعت و رطوبت محیط به‌صورت مستقل عمل می‌کنند و به یکدیگر وابسته نیستند و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با دما و سرعت محیط رابطه مستقیم و با رطوبت محیط رابطهٔ معکوس دارد. در این تحقیق مشخص شد که بیشترین اثرگذاری بر ضریب نفوذ را به‌ترتیب دما، سرعت و رطوبت نسبی به خود اختصاص داده است. در نهایت، معادله‌ای جهت تخمین ضریب نفوذ برحسب پارامترهای خشک‌شدن پیشنهاد شد چرا که با داشتن مقدار ضریب نفوذ مؤثر می‌توان خشک‌شدن سرامیک را به‌صورت ریاضی مدل نمود و در راستای بهینه نمودن پارامترها و رسیدن به محصولی سالم گام برداشت.

مراجع

1. Kowalski, S.J., "Thermomechanics of drying processes", Vol. 8, *Springer Science & Business*, (2012).
2. Crank, J., "*The Mathematics of Diffusion*", ed: Oxford, UK, pp. 296-340, (1975).
3. Efremov, G.I., "Drying kinetics derived from diffusion equation with flux-type boundary conditions", *Drying Technology*, Vol. 20, pp. 66–55, (2002).
4. Vasic, Z.M., Radojevic,R.M., Arsenovic M.V. and Grbavcic, Z.B., "Determination of the effective diffusion coefficient", *Revista Romana de Material*, Vol. 41, pp.175-169, (2011).
5. Vasić, M., Grbavčić, Ž. and Radojević , Z., "*Methods of determination for effective diffusion coefficient during convective drying of clay products*", pp. 295-309, (2012).
6. Vasić, M. Grbavčić, Ž. and Radojević, Z., "Analysis of Moisture Transfer During the Drying of Clay Tiles with Particular Reference to an Estimation of the Time-Dependent Effective Diffusivity", *Drying Technology*, Vol. 32, pp. 829-840, (2014).
7. Vasić, M. Grbavčić, Ž. and Radojević, Z., "Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 76, pp. 33-44, (2014).
8. Zagrouba, F., Mihoubi, D. and Bellagi,A., "Drying of clay. II Rheological modelisation and simulation of physical phenomena," *Drying technology*, Vol. 20, pp. 1895-1917, (2002).
9. Chemkhi, S. and Zagrouba, F., "Water diffusion coefficient in clay material from drying data", *Desalination*, Vol. 185, pp. 491-498, (2005).
10. Sander, A. Skansi, D. and Bolf, N., "Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs," *Ceramics international*, Vol. 29, pp. 641-653, (2003).
11. Boulaoued, I. and Mhimid, A., "Determination of the diffusion coefficient of new insulators composed of vegetable fibers," *Thermal Science*, Vol. 16, pp. 987-995, (2012).
12. Bakhshi, M. Mobasher, B. and Soranakom, C., "Moisture loss characteristics of cement-based materials under early-age drying and shrinkage conditions," *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp. 413-425, (2012).

۱۳. خلیلی، خلیل، باقریان، محسن، احمدی بروغنی، سید یوسف، "شبیه سازی خشک شدن سرامیک ها به کمک اجزاء محدود و مقایسه با آزمایشات تجربی"، *فصلنامه سرامیک ایران*، ۳۹-۵۳، (۱۳۹۳).

۱٤. خلیلی، خلیل، احمدی بروغنی، سید یوسف، باقریان، محسن، "مدل سازی فرآیند خشک شدن مخلوط اشباع خاک رس و انقباض قطعه در طی فرآیند"، *علم و مهندسی سرامیک*، جلد ۳، شماره ۱، ٦٥-۸۰ (۱۳۹۳).

۱۵. خلیلی، خلیل، حیدری، " محسن، مدلسازی عددی انقباض یک قطعه سرامیکی در فرآیند خشک شدن"، *مهندسی مکانیک مدرس*, دوره ۱۲، شماره ۳، ۵۸-۷۱، (۱۳۹۱).

۱٦. خلیلی، خلیل، حیدری، محسن، "بررسی تاثیر ضخامت جسم بر امکان وقوع ترک در فرآیند خشک شدن"، *مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۲، شماره ۳، ۱۰۳-۱۱٦، (۱۳۹۱).

۱۷. خلیلی، خلیل، احمدی بروغنی، سید یوسف، باقریان، محسن، "مطالعه آزمایشگاهی و عددی فرایند خشک شدن سرامیک ها و ایجاد ترک در آنها"، *مکانیک سازه ها و شاره ها*، دوره ٤، ۱۱۹- ۱۲۹، (۱۳۹۳).

18. Khalili, K. , Bagherian, M. and Khisheh, S., "Numerical Simulation of Drying Ceramic Using Finite Element and Machine Vision," *Procedia Technology*, Vol. 12, pp. 388-393, (2014).

19. Batista, L. M. da Rosa, C. A., Pinto,L. A., "Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan," *Journal of Food Engineering*, Vol. 81, pp. 127-132, (2007).
20. Hamdami, N., Monteau, J.-Y., Le Bail, A., "Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures. Part 2: Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data," *Journal of food engineering*, Vol. 62, pp. 385-392, (2004).
21. Pinto, L., Tobinaga, S., "Diffusive model with shrinkage in the thin-layer drying of fish muscles," *Drying Technology*, Vol. 24, pp. 509-516, (2006).
22. Dissa, A., Desmorieux H., Bathiebo J., Koulidiati J., "Convective drying characteristics of Amelie mango with correction for shrinkage," *Journal of food Engineering*, Vol. 88, pp. 429-437, (2008).
23. Efremov, G., Kudra, T., "Calculation of the effective diffusion coefficients by applying a quasi-stationary equation for drying kinetics," *Drying technology*, Vol. 22, pp. 2273-2279, (2004).
24. Ruiz-López, I., García-Alvarado, M., "Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity," *Journal of food engineering*, Vol. 79, pp. 208-216, (2007).
25. Vasić, M., Radojević, Z., Grbavčić, Ž., "Calculation of the effective diffusion coefficient during the drying of clay samples," *Journal of the Serbian Chemical Society*, Vol. 77, pp. 523-533, (2012).
26. Kimpton, D., Wall F., "Determination of diffusion coefficients from rates of evaporation," *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 56, pp. 715-717, (1952).
27. Yang, X.-S., "*Nature-inspired metaheuristic algorithms",* Luniver press, pp. 72-98, (2010).
28. Yang, X.-S., "Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation," *International Journal of Bio-Inspired Computation*, Vol. 2, pp. 78-84, (2010).
29. Mandal, D., Pal S. K., Saha P., "Modeling of electrical discharge machining process using back propagation neural network and multi-objective optimization using non-dominating sorting genetic algorithm-II," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, pp. 154-162, (2007).
30. Kowalski, S. J., "Thermomechanical approach to shrinking and cracking phenomena in drying," *Drying technology*, Vol. 19, pp. 731-765, (2001).
31. Somiya, S., "*Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties",* Academic Press, pp. 723-1210, (2013).